

НАНОРАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ БОМБАДИРОВКЕ ТЯЖЁЛЫМИ ИОНАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

А.И. Калиниченко, С.С. Перепёлкин, В.Е. Стрельницкий
Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»
Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина, strelnitskij@kipt.kharkov.ua

Предложена модель теплового сглаживания поверхности металлов при бомбардировке тяжелыми низкоэнергетическими ионами, альтернативная модели ионной полировки за счет ионного распыления. Получены критерии, позволяющие для произвольной комбинации «ион - мишень» определить интервал энергий иона, в котором применима предлагаемая модель, а также аналитические выражения для основных параметров процесса сглаживания (размер области сглаживания, время сглаживания).

Введение

Интерес к физическим процессам на поверхности материалов при ионной бомбардировке связан с развитием нанотехнологий, требующих для своей реализации инструментов, способных создавать и/или модифицировать наноразмерные объекты. Особенно это важно для тонкой обработки поверхностей и производства деталей размерами меньше 100 нм.

Бомбардировка тяжелыми ионами может приводить к распылению металлов и выравниванию рельефа их поверхности. Процессы сглаживания рельефа поверхности рассматривались в приближении линейной теории каскадов столкновений и были связаны с анализом процессов распыления при небольшой плотности столкновений за счет бинарных столкновений [1].

При достаточно высоких плотностях столкновений в каскадах процесс модификации поверхности металлов может приобретать качественно иной характер, подчиняющийся закономерностям термодинамики и механики сплошных сред. Возникающие в приповерхностных нанометровых областях температура и давление могут приводить к плавлению, испарению и последующему выбросу содержащегося в них материала в виде пара, многоатомных кластеров или капель, обеспечивая гигантские коэффициенты распыления [2]. Поверхность подвергается усиленной эрозии с образованием кратеров и выбросом капель нанометровых размеров, обнаруженных экспериментально [3].

Теоретические исследования процесса бомбардировки металлов тяжелыми ионами, проведенные в модели нелокального теплового пика (НТП), позволили определить необходимые условия, при выполнении которых становится возможным капельное распыление и образование поверхностных кратеров для металлов [4]. Полученные теоретические результаты качественно совпадают с экспериментальными данными [3]. В то же время представляет интерес рассмотреть эффект сглаживания тяжелыми ионами поверхности металлов, для которых модификация элементов рельефа поверхности происходит за счет воздействия интенсивных потоков тепловой энергии, не сопровождается эрозией участков поверхности мишени и развитием рельефа поверхности.

Целью работы является определение условий

сглаживания поверхности металлов тяжелыми ионами низкой энергии в модели НТП, вывод формул для основных параметров процесса сглаживания (размеры области сглаживания, длительность сглаживания) и анализ возможностей его практического использования для обработки неровностей на поверхности металлов.

Термическая модель сглаживания неровностей на поверхности металлов

Сглаживание поверхности в НТП может происходить за счет плавления материала мишени и его растекания вдоль поверхности за счет сил поверхностного натяжения в пике. При этом предполагается, что не происходит выброс расплавленного материала из объема пика и образование повреждений на поверхности мишени.

Результаты моделирования с помощью программного пакета SRIM-2008 [4] показали, что при низких энергиях образуется односвязный приповерхностный каскад возбужденных атомов с энергосодержанием $E_{ph} = \eta(E)E$, где $\eta(E)$ - относительная доля фоновых потерь иона при энергии E . Пик, возникающий на основе каскада, можно аппроксимировать сферическим сегментом с центром в середине средней длины проективного пробега иона $L(E)$ и начальным радиусом $R_{NTP} = L(E)/2 + R_T(d)$, где R_T - радиус теплового расплывания, определяемый диффузией тепловых фононов за время ион-ионной релаксации τ и зависящий от эффективного размера кристаллита мишени d [4].

Такой подход для описания физических процессов, возникающих при взаимодействии иона с твердым телом, остается справедливым в диапазоне энергий:

$$E_{min} < E \leq E_{NTP}. \quad (1)$$

Максимальная допустимая энергия E_{NTP} характеризует качественное изменение структуры каскада, приводящее к образованию нескольких слабо связанных перегретых областей. Минимальная энергия определяется возмож-

ностью термодинамического описания физических процессов в НТП.

Температура и фазовое состояние материала в объеме V сферического НТП определяются средней плотностью тепловой энергии:

$$\varepsilon(E, d) = \frac{E_{ph}}{V(E, d)}. \quad (2)$$

Будем полагать, что начальная плотность тепловой энергии в пике ε превышает плотность тепловой энергии $\varepsilon_{m2} = \rho C(T_m - T_0) + \rho q_m$, необходимую для расплавления вещества в объеме НТП. Здесь T_0 - начальная температура, T_m - температура плавления материала мишени, ρ , C и q - плотность, удельные теплоемкость и теплота плавления материала мишени. При $t > \tau$ происходит «тепловое расплывание» НТП, приводящее к увеличению его радиуса и объема и уменьшению плотности тепловой энергии и средней температуры в образующемся тепловом пике (ТП). Для оценок будем также полагать, что в процессе теплового расплывания сохраняются сферичность и положение центра НТП. Максимальные объем и радиус расплавленной области, определяющие сглаживающий эффект теплового пика, вычисляются из уравнения $\varepsilon = \varepsilon_{m2}$.

Следует отметить, что такой подход справедлив, если время остывания расплавленной области t_T превышает время, необходимое для выравнивания искривленной поверхности под действием сил поверхностного натяжения t_D . Оценки показывают, что условие $t_D \ll t_T$ выполняется для тепловых пиков нанометровых размеров. Кроме того, необходимо обеспечить выполнение условий, исключающих капельное распыление и образование кратеров. Выброс расплавленного материала с образованием кратера возможен, если энергия упруго-напряженного состояния W_{el} , идущая на отрыв капли, равна или превосходит энергию W_s , необходимую для формирования поверхности капли и кратера. При $\varepsilon > \varepsilon_{b1}$, где ε_{b1} - плотность энергии, при которой начинается кипение, процесс кипения в объеме ТП также может приводить к кратерообразованию [4].

Таким образом, эффект сглаживания имеет место при выполнении условия (1), а также условий:

$$\varepsilon_{m2} \leq \varepsilon(E, d) \leq \varepsilon_{b1}, \quad (3)$$

$$W_{el}(E, d) < W_s(E, d), \quad (4)$$

определяющих допустимый интервал энергий иона.

С учетом сказанного, максимальный радиус R_s расплавленной области можно представить в виде:

$$R_s(E) = k_s \sqrt[3]{\frac{3\eta(E)E}{4\pi\rho[C(T_m - T_0) + q_m]}}, \quad (5)$$

где $k_s(E, d)$ - коэффициент, учитывающий форму образующегося пика. Значение k_s слабо изменяется (в пределах от 1.0 до $\sqrt[3]{2}$) при изменении формы пика от сферической к полусфере; в дальнейших расчетах полагаем $k_s = 1.1$.

Оценим основные параметры процесса сглаживания в модели НТП на примере сглаживания полусферических неровностей радиусом R_a . Предполагая, что $R_s \ll R_a$, можно оценить среднюю высоту h_s , сглаживаемую тепловым пиком одиночного иона:

$$h_s(E) \approx \frac{R_s^2(E) h_{min}}{R_a^2} \ln \frac{R_a}{2h_{min}} \left(1 - \frac{L^2}{4R_s^2}\right)^2, \quad (6)$$

где h_{min} - минимальная высота шероховатости, при достижении которой процесс сглаживания прекращается. Сглаживаемый объем V_1 представляет собой шаровой сегмент высотой h_s и радиусом R_a , который равен $V_1 = \pi h_s^2 R_a$.

Оценим длительность процесса сглаживания поверхности t_s , которую можно определить исходя из объема шероховатости единицы поверхности мишени $V_a \approx \pi R_a^2/6$ и скорости объемного сглаживания $V_s = jV_1$, где j - плотность потока ионов, падающих нормально на поверхность мишени:

$$t_s(E) = \frac{V_a}{V_s} = \frac{1}{6jh_s^2}. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

Моделирование, выполненное с помощью программного пакета SRIM-2008, позволило определить форму, геометрические параметры НТП, образующихся в мишенях из Ag, при нормальном падении иона Xe^+ с $E \leq E_{NTP}$ на поверхность мишени, фоновые потери ионов E_{ph} в мишени, максимально допустимую энергию в модели НТП. Значения E_{NTP} растут с увеличением размера кристаллита d . Максимальная допустимая энергия для аморфной, нанокристаллической ($d = 2$ нм), поликристаллической мишеней из Ag принимает следующие значения: $E_{NTP} = 20, 16, 13$ кэВ, соответственно. Полученные значения параметров НТП позволили оценить плотность тепловой энергии в образующемся НТП ионов Xe^+ , выполнение энергетического критерия сглаживания, пороговые значения энергии сглаживания E_1 , E_2 для мишеней различной структуры, длительность полного сглаживания неровностей при заданной плотности потока ионов.

На рис. 1 приведены зависимости плотности энергии ε в НТП ионов Xe^+ от их энергии E для аморфной, нанокристаллической ($d = 2$ нм), поликристаллической серебряных мишеней

(кривые 1 – 3, соответственно). Пунктирная линия ограничивает применимость модели НТП со стороны высоких энергий. Штриховкой отмечены диапазоны энергий, в которых происходит сглаживание выбранных мишеней.

Как видно из рис. 1, пороговая энергия E_1 и диапазон энергий сглаживания возрастает с увеличением размера кристаллита d . Условия (3), (4) выполняются для мишеней различной структуры в следующих интервалах энергий: 105 – 290 эВ, 490 – 1950 эВ и 2,1 – 20 кэВ для аморфных, нанокристаллических ($d = 2$ нм) и поликристаллических образцов, соответственно.

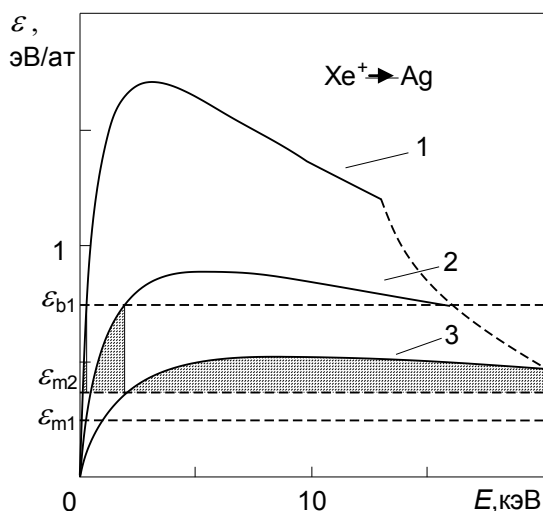


Рис. 1. Зависимость плотности энергии ε в НТП ионов Xe^+ от энергии E для мишеней из Ag.

Анализ выражения (7) показывает, что время сглаживания уменьшается с ростом энергии падающего иона и слабо зависит от структуры мишени. При $E = E_{\text{НТП}} = 20$ кэВ размер области теплового сглаживания поликристаллической мишени достигает величины $D = \sqrt{4R_s^2 - L^2} \sim 10$ нм, при этом средняя высота сглаживания h_s в тепловом пике иона составляет $\sim 0,005$ нм.

При бомбардировке ионами Xe с плотностью потока $j = 1$ мА/см² и энергией $E = 3$ кэВ поликристаллической мишени из Ag с неровностями высотой $R_a = 100$ нм длительность

сглаживания до величины неровностей $h_{\text{min}} \sim 10$ нм составляет $t_s \sim 30$ сек.

Для сравнения отметим, что время ионной полировки серебряных мишеней за счёт процессов распыления при тех же условиях, по порядку величины, совпадает с приведенной оценкой [5]. Следует подчеркнуть, что исследуемый процесс сглаживания происходит не из-за распыления поверхностного слоя мишени, которое может приводить к загрязнению внутренних поверхностей вакуумной камеры и мишени, а за счет перераспределения материала благодаря выравнивающему воздействию сил поверхностного натяжения.

Заключение

Предложена модель теплового сглаживания поверхности металлов при бомбардировке тяжелыми низкоэнергетическими ионами, альтернативная модели ионной полировки за счет атомного распыления. В соответствии с предлагаемой моделью эффект сглаживания шероховатой поверхности тяжелых металлов с аморфной, нанокристаллической или поликристаллической структурой может наблюдаться при ионной бомбардировке за счет расплавления материала в нелокальных тепловых пиках тяжелых ионов низкой энергии. Получены критерий, позволяющий для произвольной комбинации «ион - мишень» определить интервал энергий иона, в котором применима предлагаемая модель, а также аналитические выражения для основных параметров процесса сглаживания (размеры области сглаживания, длительность сглаживания).

Список литературы

1. Sigmund P. // Phys.Rev. 1969. V. 184. P. 383-416.
2. Bouneau S., Brunelle A., Della-Negra S., et al. // Phys. Rev. B 2002. V. 65. P. 144106-8.
3. Donnelly S.E., Birtcher R.C. and Nordlund K. / In book "Thin films and nanostructures with ion beams" ed. E. Knystautes. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 20-91.
4. Калиниченко А.И., С.С. Перепёлкин С.С., Стрельницкий В.Е. // Вісник ХНУ №1059. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». 2013. вип.3 /59/. С. 57–64.
5. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 249 с.

NANOSIZE PROCESSING OF METAL SURFACE AT BOMBARDMENT OF HEAVY LOW-ENERGY IONS

A.I. Kalinichenko, S.S. Perepelkin, V.E. Strel'nitskij

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology",
1 Akademicheskaya Str., Kharkov, 61108, Ukraine, strel'nitskij@kipt.kharkov.ua

The model of thermal smoothing of metal surface at bombardment by heavy low-energy ions is proposed. The model is alternative to the model of the ion polishing due to ion sputtering. The criteria to determine interval of ion energy where the proposed model is available were obtained for arbitrary combination "ion - target". Also, the analytical expressions for basic parameters of smoothing process, i.e. dimension of smoothing area, time of smoothing, were derived.